3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А. Д. Абдыев, Е. Д. Клевитская, И. И. Матюш

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Е. Н. Савкова

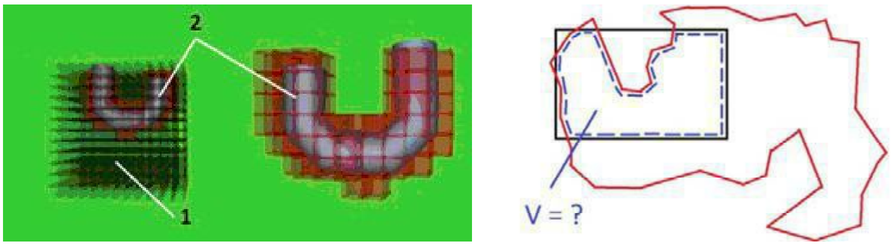
Многообразие решаемых задач в контроле и испытаниях продукции с использованием информационно-измерительных систем предполагает многопараметрические исследования свойств объектов, что обуславливает необходимость разработки описательного метрологического аппарата. Понятие неопределенности тогда трактуется как геометрическое место точек в некотором функциональном пространстве свойств. Применительно к координатным измерениям ГОСТ Р 54500.3.2–2013 рекомендует использовать математический аппарат по расчету неопределенности, основанный на представлении результата измерения как набора вектор-столбцов (модель математических ожиданий) и ковариационных матриц (модель рассеяния). В развитие данного документа авторы сделали попытку расширить видение моделей результатов измерений с учетом возможностей, предоставляемых современными 3D-технологиями для визуализации и наглядного представления неопределенности. В данном аспекте задача сводится к определению элементарного участка функционального пространства.

Классический подход. Классическое вычисление объема тела сложной формы – достаточно сложный процесс и представляет собой определенный интеграл. Предположим, что известна площадь сечения некоторого тела плоскостью перпендикулярной к оси. Эта площадь будет зависеть от положения секущей плоскости, т. е. от x: $Q = Q(x)$. Тогда объем этого тела будет интеграл от функции $Q(x)$ на отрезке $a \le x \le b$:

$$V = \int_a^b Q(x)dx.$$

Вычисление объема произвольного многогранника в трехмерном пространстве достаточно нетривиальная задача. Существует тривиальный подход: разбить объем на простые пирамиды и посчитать сумму этих объемов. Однако данная методика является сложной в реализации, поскольку требует больших затрат времени и не позволяет выполнять операции алгоритма в параллельном режиме [2].

Предлагаемый подход. Для целей метрологического описательного аппарата авторы предлагают использовать подход, изложенный в [3], основанный на том, что вокруг некоторой фигуры строится прямоугольная сетка, используя ее минимальные и максимальные координаты (см. позиции 1 и 2 на рис. 1, *а*).



а) *б*)

Рис. 1. Принцип определения объема тела сложной формы:
а – нанесение прямоугольной сетки; *б* – отображение исследуемого объема

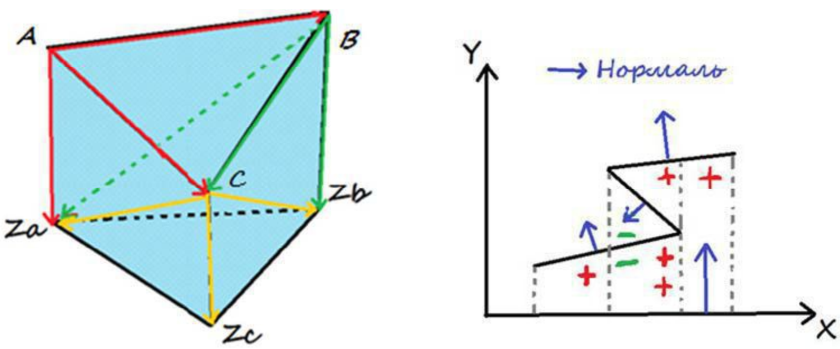
Далее задача сводится к расчету и последующему суммированию элементарных объемов, занимаемых фрагментами в ячейках, как показано на рис. 1, *б*. Практически во всех случаях геометрия объекта представляет собой связанный набор треугольников с соответствующим обходом (или нормалью). Этот набор можно хранить единым массивом и обращаться к нему параллельно из каждой ячейки или выполнить предварительную обработку для всех ячеек.

Технология вычисления объема сводится к следующим этапам.

Шаг 1. Провести отсечение ячейкой сетки. Для упрощения и ускорения алгоритма отсечение производится с помощью шести образующих бокс плоскостей.

Шаг 2. Спроецировать на плоскость *XOY* все полигоны, образующие отсеченный меш. Вычислить объем под каждым из треугольников. Объемы вычисляются как суммы объемов трех пирамид, образующих фигуру (рис. 2, *а*).

Шаг 3. В зависимости от ориентации нормали частные объемы входят в сумму с разным знаком (знак скалярного произведения нормали полигона и плоскости проекции на рис. 2, *б*).

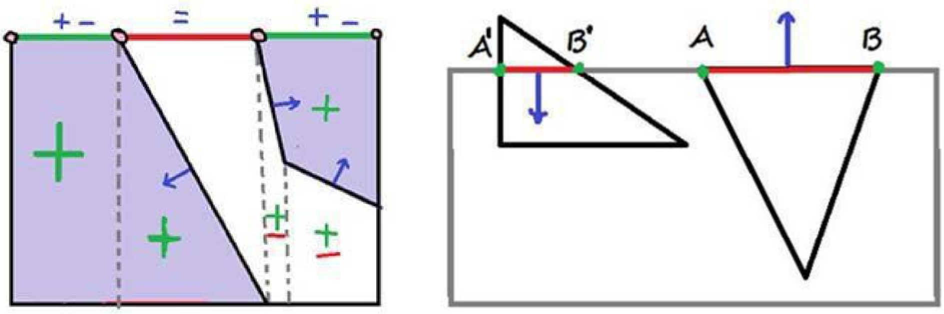


а) *б*)

Рис. 2. Отображение объема многогранника как суммы объемов
трех образующих его пирамид:
а – отображение области в виде бокса; *б* – расстановка знаков
при вычислении объема под треугольником

Шаг 4. Вычислить площадь сечения, образованного верхней плоскостью бокса (параллельной плоскости проекции) и пространства. Для вычисления полного объема объекта внутри бокса следует не только отсечь его боксом, но и замкнуть, что является достаточно трудоемкой задачей. Для получения объема все треугольники проецируются на плоскость бокса. Следовательно, можно упростить вычисления замыканий, обработав лишь верхнюю грань, так как проекции остальных граней на плоскость бокса дают нулевую площадь.

Модификация учитывает незамкнутые случаи (полигон может пересекать ребра верхней грани бокса, в данном случае – прямоугольника). В таком случае верхнее ребро грани должно образовать замыкание двухмерного полигона. Нет необходимости вычислять замыкание на всех ребрах верхней грани, а достаточно вычислить замыкание только на верхнем ребре. Таким образом, дальнейшие действия происходят на одном отрезке. В связи с такой бинарной структурой нормали можно разделить на «левые» (–1) и «правые» (+1). На рис. 3, *а* изображена схема вычисления замыкания на верхнем ребре. Далее ребро разбивается на отрезки и каждому отрезку в соответствие ставится число нормалей. Под числом нормалей отрезка будем понимать число нормалей, направленных от данного отрезка, минус число нормалей, направленных к данному отрезку, причем учитываются только нормали тех треугольников, которые имеют одно пересечение с ребром.



а) *б*)

Рис. 3. Принцип вычисления элементарного пространства:
а – схема вычисления замыкания и соответственно общей площади;
б – пересечение треугольника и ребра на отрезке

В зависимости от реализации предыдущих шагов алгоритма могут возникать некоторые граничные ситуации (рис. 3, *б*). Рассмотрим случай, когда треугольник пересекается с ребром на некотором отрезке *AB* (больше одной точки пересечения). Необходимо «заблокировать» отрезок *AB* от дальнейших вычислений числа нормалей на нем, так как площадь под данным отрезком учтена, потому что этот отрезок присутствует в списке граней двухмерного полигона, и невозможно спроецировать нормаль на ребро.

На первом шаге алгоритма при определении сечения меша с каждой ячейкой возникают случаи, когда сечений меша с ячейкой нет (ячейка находится либо внутри, либо снаружи). Такие ячейки необходимо помечать как пустые (свободные). Если сечение меша с ячейкой есть, то такие ячейки помечаются как занятые. Далее необходимо промаркировать свободные ячейки как входящие в объем или не входящие. Например, пометить нулем не входящие в объем ячейки или пометить значением величины объема ячейки, если в объем входит. Для этого можно использовать один из двух алгоритмов или их комбинацию: алгоритм построчного сканирования или алгоритм рекурсивного заполнения объема. Суть первого алгоритма заключается в том, что выбирается произвольное направление (например, вдоль оси *OZ*) и плоскость вдоль выбранного направления. На плоскости построчно сканируется каждая строчка, представляющая собой последовательный набор ячеек вдоль выбранного направления.

Суть второго алгоритма сводится к выборке любой свободной ячейки и рекурсивному анализу соседей с их последующим добавлением в очередь для выборки. Если соседом является заполненная ячейка, то эта ячейка не включается в очередь для выборки. Как только выбрать соседа уже невозможно, вся выбранная последовательность ячеек отмечается как находящаяся в неком объеме. Выбирается следующая случайная ячейка, и проводятся аналогичные действия. В результате все свободные ячейки маркируются как принадлежащие к определенному объему.

Заключение. Таким образом, представленный подход основан на алгоритмах быстрого вычисления объема произвольной многосегментной геометрии в пространстве. Алгоритм можно использовать, например, для определения объема нефти или газа в месторождении, а также для расчета неопределенности в многопараметрических измерениях.

Литература

1. ГОСТ Р 54500.3.2–2013. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин.
2. Интернет-ресурс. – Режим доступа: http://blog.simmakers.ru.
3. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление / Н. С. Пискунов. – СПб. : Мифрил ; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1996. – Т. 1. – 416 с.